計算のダイナミクス

佐藤 譲*

理化学研究所 脳科学総合研究センター

1 はじめに

Turing machine は計算機のモデルである, といわれることがあるが, Turing は計算機のない時代に, 計算している人間を詳細に観察, 抽象化してこのモデルを得ている [16] ので, 実際にはこれは人間の「思考」の現象論的モデルであるといってよい. 「計算」というアルゴリズム概念の抽象化は数学的にも重要な意味をもつが, 当初の動機は人間の思考過程への興味であった. 以下 Turing machine の構築の過程を追ってみよう (以下は [16] での記述の概要. 図 1 も参照).

計算は通常紙の上でペンを走らせ, 記号を操作することで実行される (1). 紙が 2 次元的であることは本質的でないので, 1 次元のテープのようなものであるとしてよい (2). ペンについては相空間 (紙) の外に無限のインク源があるとする. アルファベットと数字が操作対象であるが, (中国語等の特殊な例を除くと) 一般にこれらの記号は有限個である. (仮に記号が無限個あるとすると, いくらでも近い形の記号が存在することになる.) 記号はとくに $\{0,1\}$ の 2 個としても一般性を失わず, この場合は記号の修正は $0 \leftrightarrow 1$ の書き換えのみとしてよい. 記号の読み出しは瞬時に起こり, かつ観測範囲は局所的であるという仮定から, テープ上にマス目を導入できる (3). マス目には 0 または 1 が書かれていて, 観測されたマス目上の記号のみが修正されていくとしてよい. 記号の操作範囲は局所的であり, ペンの移動はテープ上の左右のひとマスのみとする (4). 記号操作はその時点で観測されたマス目上の記号と操作者の「心の状態」によって定まる. 心の状態が無限個であるとすると任意に近い状態が存在して混乱してしまうので, この内部状態は有限個とする (5). 覚えておきたい複雑なことは紙の上にいくらでも書き留めておけるので, 内部状態の有限性は系の計算能力を制限するものではない. 以上で計算の抽象モデルが得られた (6).

人間の頭脳や精神の働きのメカニズムは現時点では全く未解明といってよいが, 上述の程度の思考過程については, とくに不思議なことは何もなく, 「有限個の内部状態

*Email: ysato@bdc.brain.riken.go.jp

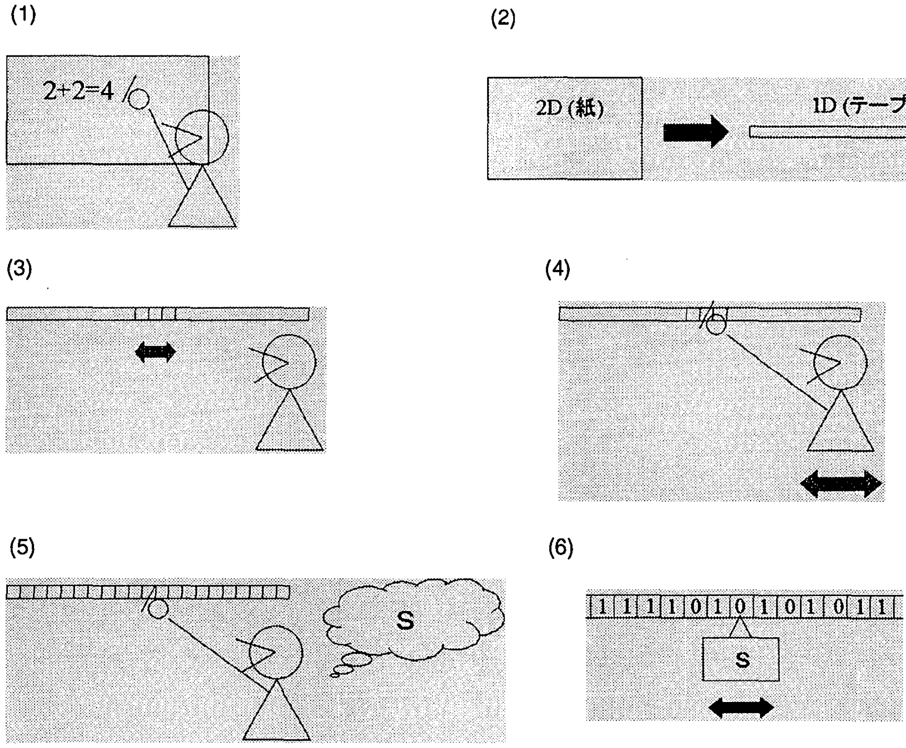


図 1: Turing machine の構成

と外界にあるシンボルの局所的な読み書きの能力を仮定すれば実現可能である.」というのがここでの論点である[1]. Turing のモデルは思考機械の実体化の可能性を鮮やかに描き出し, これをもとに現在の電子計算機が作られた.

後に提示された Turing test の枠組み [18] は, つまりは「純粋思考」そのものとの対話についての考察であり, Turing にとっては Turing machine それ自体が機械的に具現化された人間知性であった[2]

このような古典計算主義的描像は多くの脳・認知科学研究者の典型的批判対象であり, Turing machine はその象徴である. しかし一方で Turing machine に変わるようなより現実味のある思考のモデル[3] は今のところ存在しない. この点に関して Tsuda の人間の脳に対する動的な描像 [15] に肯定的な可能性があるように思えたのが著者の

[1]したがって人間の思考は Turing machine のような単純なものではない, という批判は見当違いである. どれだけ単純なもので実現可能か? ということを考えたのだから. 一方これは構成の可能性についての議論にすぎないので, 人間の思考 Turing machine で全て記述できる, という主張は完全な誤解である. 「全て記述できる」という主張と計算万能性は全く無関係である. また Turing 計算論というのは単に数学の一分野だ, という態度については, 本論の立場からみると, 全くの堕落と言わざるをえない.

[2]この研究は後の人工知能研究の哲学的基礎となったが, 実際には計算機それ自体がすでに人工知能であるといってよい. むしろ対峙する人間に知性を感じさせるようなシステムを Turing machine 以外の形で構成することが可能か? というのが次に考えるべき問題の一つであったといえる.

[3]思考といってしまうと問題設定が乱暴すぎるが, ここでは例えば記憶の形成, 想起, 修正とそれに基づく行動といった心的表象の操作論というくらいの意味で考えている.

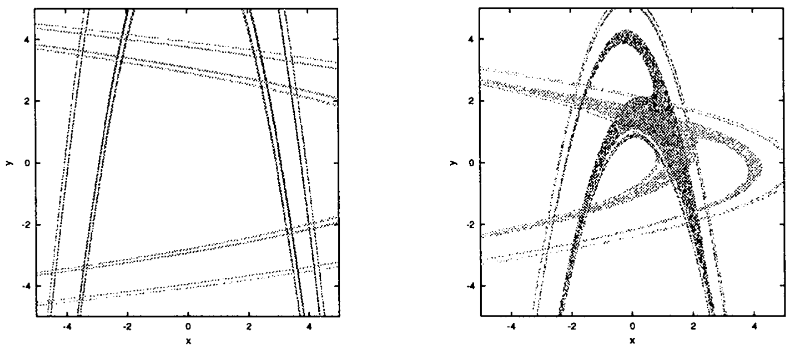
研究の動機の一つであった. ここでは力学系的視点に基づいて「計算」という現象を考察してみる.

2 計算のダイナミクス

なぜ力学系アプローチをとるかということについては様々な理由があるが, 系の時間構造を記述できる強力な方法だからであるというのがその一つである. 実際の人間の思考や行動は豊かな時空間構造を持ち, 相互に干渉しあっているので, あっさり Turing machine で近似はできないだろう, というのは誰でも持っている直観であろう. ではここで考える計算のダイナミクスとはどういうものか. 最初のステップとして, ここではこの問題を次のように考える.

(1)「動的システムが計算しているようにみえるとき系はどういう状態にあるか ?」

Turing machine が適当な 3 次元の flow に symbolic dynamisc の形で自然に埋め込まれうるということは知られているが [7], 問題は系のダイナミクスの時空構造が本質的にかかわる別種の計算過程がみいだせるかどうかである. [13] では系の非双曲性をその実行している計算のアナログ性としてとらえ, symbolic dyanmics で記述できないアナログ操作のモデルを与えている (図 1). このような系の計算能力は原理的には Turing machine より大きく, 非常に奇妙な「記号操作」をしている (あるいは記号操作をしているとみなすことができなくなっている), といえる. この性質は力学系的には, 擬軌道追跡性[4] を念頭におくと理解しやすいだろう.



a=12.0, b=−1.0. a=3.0, b=−1.0.

図 2: Hénon 写像とその逆写像: $T_0(x,y) = (a - x^2 + by, x)$, $T_0^{-1}(x,y) = (y, (x - a + y^2 + by)/b)$. 操作の最小単位を Hénon 写像とすると, 双曲性を持つ場合 (左, $a > (5+2\sqrt{5})(1+|b|)^2/4$) では普遍集合上で Turing machine が導入されるが, 非双曲な場合 (右, $a > (5+2\sqrt{5})(1+|b|)^2/4$) ではその描像は崩れる.

[4] Turing machine で軌道を追跡可能な力学系とそうでない系の構造的な違いに端を発した問題. 双曲力学系は擬軌道追跡可能, すなわち Turing machine でエミュレート可能である. ここでは擬軌道追跡性の破れをアナログ計算過程の必用条件と考えている.

またこの構造は懸垂によって高次元の flow に埋め込まれる．逆に言えば高次元の flow の中には Turing machine や上述のアナログ機械とみなせるものがある．つまり適当な観測装置を固定して系の振る舞いを記号操作として眺めたときに，複雑なダイナミクスの中にある種の計算機械がみいだされることになる (図 3)．とくに系が双曲性をもつとき，ダイナミクスは古典的な Turing machine の計算過程として観測されうる．この場合カオスの存在は non-trivial な計算を行う上で必須の条件となる．

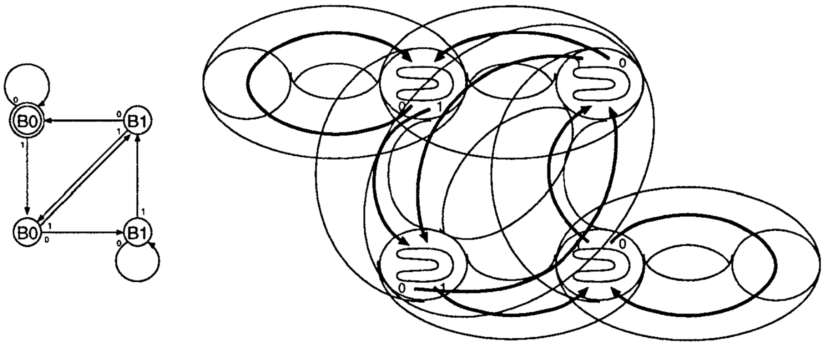


図 3: アナログ機械を内包する flow の模式図

しかしここで注意したいのは，完全に Turing machine とみなせるような系は双曲性をもつ理想的な系に限った話であり，ほとんどの現実的な系にはそのような構造はみられない，ということである．むしろ安定に観測，記述される性質だけを抽出したのが，前述の Turing の観察であったといえるだろう．現実の系には切りとって計算機械として記述てきるものの背後に複雑な力学構造があって，その構造が見た目の計算過程に重体な影響を及ぼす．我々はいつでもどんな系に対してもそれをある種の古典的計算機械 M とみなすことが可能なわけだが，そのような解釈が安定に存続するのはまれである．非線形な力学系では時間的あるいは空間的な要素間の干渉が生じて，いったん立てた計算機械 M としての解釈は即座に崩壊する．それを外からみているとあたかも M を超越した振る舞いをしているようにみえることになる．こういった系は外的な撹乱に強く，ill-defined な「計算」も惑わずに実行できるような柔軟性を持つが，一方で論理的な緻密さに欠け，不穏な挙動を示すことが多い[5]．こういった性質は Turing machine と人間の思考の違いの一面を表しているともいえるだろう．

[5]これは著者がモデルシミュレーションをしていて感じた印象である．ほとんどの場合，単に挙動が予測不能というだけでなく，系に指令を与えて制御すること自体不可能だったのだが，妙なところで安定な誤動作を維持していたりした．

3　発展

発展として並列計算, 模倣, 対話, 学習の 4 つの問題を議論し, いくつか問題提起をする.

3.1　並列計算

非線形力学系のダイナミクスは基本的に要素どうしが並列に干渉しあいながら発展していく. この様相を並列な計算過程[6] とみてとれる場合があるかもしれない.

具体例として折り紙を折る動作を考える. 折り紙は順序だてた操作列が与えられれば所望の形を作ることができるが, これはターゲットを正確に構成するシーケンシャルなアルゴリズムが与えられたからだといってよい. また「両端をもって広げながら畳む」といったようにいくつかの折り方を同時に干渉的に実行することが必要な場合もある. これは素朴な意味で並列計算過程といってもよいだろう. さらに例えば「紙の中心をつまんで持ち上げ, 右にひねる」という操作[7]になると有限個の単純な操作列の組み合わせでは達成不可能な並列操作になるだろう.

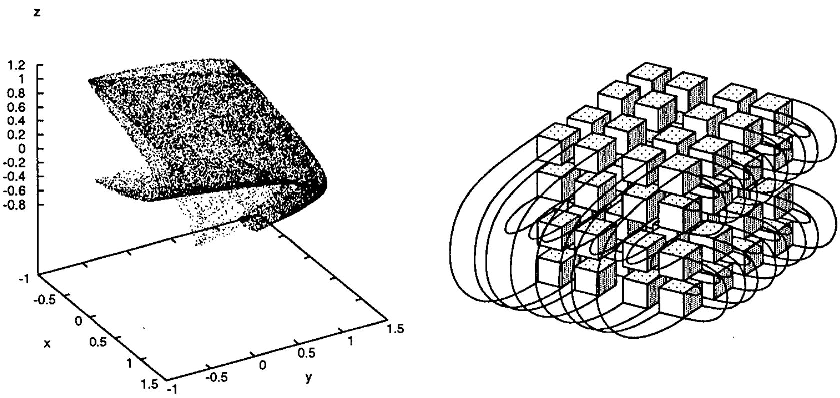


図 4: Hénon 写像の合成系: $T_x(x,y,z) = (1 - a_1x^2 + b_1z, y, x)$, $T_y(x,y,z) = (x, 1 - a_2y^2 + b_2z, y)$ として合成系 $(1-e)T_y \circ T_x + eT_x \circ T_y$ の $e = 0.5$, $a_1 = a_2 = 1.5$, $b_1 = b_2 = 0.17$ のときの attractor (左) と a_1, a_2 が充分大きいときの普遍集合を生成する horseshoe 構造 (右). $e = 0$ または 1 のときは異なる 2 つの引き延ばし方向をもつ Hénon 写像のシーケンシャルな作用 (例えば $\epsilon = 0$ のときは T_x を適用後, T_y を適用) に分解できるが, そうでないときは全体で 3 次元の写像になる.

こういった性質をもつダイナミクスは高次元系に普通にみられるし (図 4 はその一

[6]そもそも「並列計算」, あるいは一般に「並列な情報処理」といっても単に言葉があるだけで, 明確な概念化はなされていない. コネクショニズムの PDP [12] についても実際にはどういう情報処理過程なのか全く明らかでない. 一般的な並列計算モデルの構築は計算機科学においても未解決の問題である.

[7]具体的には例えば「薔薇」を折るときにこのような操作が必要となる. 教則本でのこの操作の記述はアルゴリズムというよりレシピに近いものになっていて, 折る人によって違う薔薇ができる.

例), 一般にこのような干渉的な同時作用は非線形力学系で自然に記述できる. このようなダイナミクスによってなされる並列計算はどういった性質をもつかという問題は興味深い問題である. この問題を考えるためには Horseshoe の線形重ね合わせの形に分解されないような高次元カオスの generator の考察が必要になるだろう. 脳内の高次元ダイナミクスと人間の意識的思考や対話に見られるシーケンシャリティとの関連も議論できるかもしれない.

3.2 模倣と自己言及

Turing machineのもつ重要な性質として模倣機能がある. Universal Turing machine (UTM) というある特別な計算機械があって, この機械は他の全ての機械の記号操作を模倣できるという性質である[8]. そこで

(2)「ある動的システムが別の動的システムを模倣するにはどういうメカニズムが必要か ?」

という問題設定ができるが, これは (1) とほぼ同等の問題といってよいだろう. 無限の入れ子構造を内包できるカオティックなダイナミクスには UTM も埋め込むことが可能で, このような力学系を一つ固定するとその力学系を含むあるクラスの力学系の全ての軌道は初期値を parameter として全てエミュレートされる. 一方で動的なシステムにおいては時間構造を基底にした UTM とは異なる動的な模倣のメカニズムが可能かもしれない. 素朴に parameter を変化の時間スケールが相対的に大きい変数とみた場合には, 模倣は記述された操作の実行というような過程ではなく, より動的な関係性に基づくプロセスになるだろう.

関連する話題として J. von Neumann の自己複製オートマトンの理論がある [8]. これは Turing machine の模倣能力の応用である. 生物は自分とよく似た系を産み出す能力を持つが, そのために何か神秘的な性質が必要なわけではなく, たかだか UTM と同程度のメカニズムで自己複製の機能は実現されうる, というのがその結果であった. 実際には Kleene の第二帰納定理から系自身を記述するコードの存在が示され, これと組んでプログラムの自己複製可能性が数学的に示される. このとき系は自分自身を観察して同じ系を複製し, その複製が複製をつくり... という連鎖的過程が生じる[9]. この

[8]具体的には他の機械の記述 (プログラム) を読んで, そこに書かれている操作を入力データに対して実行するというだけのことなのだが, ここではプログラムもまた入力データの一部として与えることができるという点が重要である. そのため UTM は入力データを適当に与えれば, 他の機械の行うどんな記号操作も模倣できるという性質 (計算万能性) をもつとされる.

[9]自分自身を実際に観察するかわりに, 自分の記述 (プログラム) を観察し自己模倣する, という点が, ここでも重要となる. また同じものを複製し続けるというだけではなく少し違ったものを複製する系の存在もしられている. 「X が Y を複製する」という過程を $X \to Y$ とかくと, $A \to A' \to A'' \to A$ のように複製過程がサイクルとして閉じている系 [3] や, $A \to A+B \to A+B+C \to \cdots$ といったように一方的に系の自由度を肥大させていく系 [10] もある. 複製過程がカオス的に閉じているものについてはまだ知られていないが, おそらく構成可能であろう. これらのモデルでは系自身の記述は記号列という形で静的に局在している.

ロジックをオートマトンに具体的に実装することにより，自己複製系の離散モデルが得られる．Neumann は自己複製系を単純な 2 次元セル・オートマトン上の時空パターンの形で構成し，空間的な組み立て可能性やノイズによるオートマトンの進化を議論した[10]．Neumann は連続系 (PDE) でも同様のメカニズムが可能だと考えていたようだが，これは未解決の問題である．この場合は最低限時空パターンとしての動的な記憶構造に対する議論が必要となるだろう．自己言及の力学系的描像については本稿片岡直人氏の研究 [5] があるが，まだはっきりしない．

3.3 対話と文法

感覚遮断実験や言語的対話[11] を考えると想像できるように，人間の「思考」は他人との相互作用によってはじめて発現する機能なのかもしれない．ここではこの問題を直接考えるかわりに，2 つの相互作用する力学系の間に対話によって誘起される動的な文法構造について考察する．

Chomsky の生成文法は人間が生得的にもつルールであったが、実際には文法はこのような形で現出するのではなく，対話に依存して現れる一時的な構造という描像の方が適しているかもしれない．

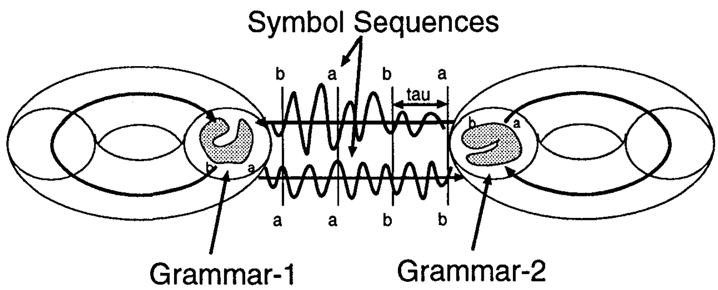


図 5: 動的文法構造の概念図

図 5 にみるようにこの描像では時系列の切断の仕方 (メッセージ系列の記号化のされ方) によって，結果的に文法構造が導入される．2 節と同様のロジックでこの文法構造は

[10] Neumann の結果は Watson と Click の DNA の発見に先立つものであったが，この枠組みでは「遺伝子」はセル・オートマトン上の「時空パターンの一部」でかつ「情報の引き出しに対して安定に記憶を保持できる状態」でありさえすればよく，物質として局所的に存在している必然性は全くない．したがって「設計図=遺伝物質=DNA 分子」というスキームはこの理論の特殊解にすぎない．理論上は別種の非自明な解が存在し，かつ力学系的に構成できるはずである．このような考え方は [4] にもみられる．

[11] 方言と標準語の 2 種類の日本語を話す人 A がいて，地元の知人 B とは方言で話すが，C とは標準語で話すという状況を考える．A は B とは方言で流暢に対話できるが，C とは対話がまごついてしまって標準語でしか話せない．人によっては外国語で話すときのように方言が自由にでてこなくなくなることもあるらしい．この場合，方言にしたがう言語生成という思考過程は A 自身が固有に持っているとするのではなく A+B という複合系でみられる現象という形で捉えた方が自然かもしれない．Turing のモデルもある意味紙との対話だったのだが，ここでは多主体系でのゲーム的な状況を考える．

ある理想極限でChomsky文法と一致する. やはり構造安定なのはChomsky grammarタイプのダイナミクスだけである. 書き文字等によってこの構造を強引に安定化することは可能ではあるが, 一般にはコミュニケーションに対して不安定な文法規則にしたがって対話が発展していくことになる. 記号伝達の土台に濃淡を持った連続系があり, 同じ記号列を送った(ようにみえた)にもかかわらず, 背後のダイナミクスの影響で, ある場合にはそれが全体の対話の構造を質的に変化させることがあるだろう. この場合モデルsimulationでは対話時の例外的語用に対応するダイナミクスがみられると予想されるが, ここではそれが具体的にどういった性質をもっているか, また一般にこのような文法の安定性, 柔軟性, 並列性[12] はどういった性質を持つか等に興味がある. またいわゆる言語の進化に関しては, 時系列生成 → 観測による離散化 → その離散構造に基づく生成系の修正 → 時系列生成 → ⋯ といった発展の描像も考えられるだろう.

3.4 学習と記憶

Turingは計算機械の自己組織化について「基本的な作用をする多くのcomponentをunsystematicに組織化していくと何が起こるか」という問題設定の下にunorganized machineという自己修正系のモデル[13] を与えた [17]. この動機は後の形態形成の研究 [19] へと継承されていくわけだが[14], ここでも学習をパターン形成の問題として考察する.

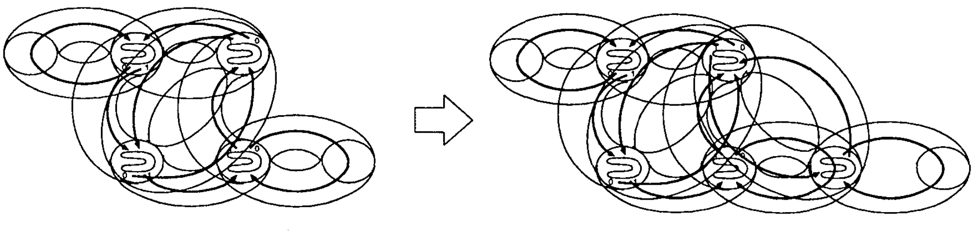


図 6: アナログ機械の組織化の模式図

外界との相互作用によって時間的に構造が変化していく力学系を適当に観測したと

[12]並列的な対話については, 素朴に発話と表情や行動の関係, あるいはアフリカのブッシュマン族の言語 (互いに参照しあう2トラックの伝達系列を1人が同時に生成して対話する) のような例があげられる.

[13]Learnable Boolean network の一種. [17] 参照.

[14]Turingはいわゆる Turing パターンの研究において, unorganized machines という原情報処理系の組織化 (あるいは学習), という視点で形態形成 (例えば脳組織の構造化等) をとらえていたと考えられる. この立場からみると, その後のパターン形成に関する純粋な力学系研究は純粋な計算理論の研究と同様にやや論点を外している, といっていいのかもしれない. この点に関しては文献 [17] と [20] に詳しい. Turingは葉序のパターンや組織の (非) 対称性, 体表の縞模様といった素朴な形態形成の問題も研究したが, これらの研究が人間の頭脳の働きの問題と全く無関係とは限らないという旨の書簡 ([20] 参照) を1951年に生物学者の J. Z. Young に宛てている.

き, 2節で論じた類の計算機械も構造を変化させ, ときには機能的に組織化されていくような志向性が見いだされるかもしれない. この状態を系が「学習」している様相と考えてもよいだろう.

具体的には図6の相空間において, 環境とのかかわりで頻繁にダイナミクスが通過する領域のflow構造が強化され, そうでない部分のflow構造が抑制されていくような動的なHebb則に類するものを考えなくてはならないかもしれない. 一般には流れの生成/消滅は必ずしも各部分系について独立に生じるわけではないので, componentは必ずしもモジュール的にはならないが, 流れの構造的修正の結果として機能的な組織化が観測されることがあるだろう. 構造不安定な部分系ではダイナミクス全体の構造が突然変わることもあるだろうが, むしろそういった急激な変化の可能性があることにより系の適応能力が保持されるといってもいいだろう. 非線形な動的システムはある程度の環境変化に関しては大体以前と同相なダイナミクスを維持できるが, 環境変化がある限界に達すると大幅に行動様式や考え方を変えることができる, というような高次の柔軟性を潜在的にもっている.

こういった観点に基づく動的学習論の構築は興味深い問題である. 系の機能的階層性を議論するためには3.2で論じた動的な記憶構造と併せて議論していく必要があるだろう. 自己修正のメカニズムをどう考えるかはまた別の問題となる.

4 おわりに

計算に限らず他の多くの情報論的概念にも本論と同様の考察が可能であり, かつ必要である. 例えばShannonの情報理論は人間のメッセージ伝達の理論であったし[14, 11], オートマトンやニューラルネットワークは生物や脳の組織と機能のモデル[8, 6], Chomsky言語論は人間と動物の認知構造の差異を動機として論じられており[2], 論理は人間の言語的推論とそれに伴う納得の構造の考察であり[1], Wienerのフィードバック制御論は動物の適応行動の研究から導かれ[21], Morgensternの思い描いたゲームの理論は人間どうしの動的なかけひきを捉えられる理論であった[9]. それぞれ当初は現実世界の認知的現象を非常にvividな視点から考察していたわけだが, こういったいわゆるサイバネティクス情報論は, 今やおしなべて「そうであってはならない構造」という批判の象徴でしかなくなってしまった[15].

これらに変わるより現実味のある動的な情報論の模索は, 生物や人間を理解していく上で重要なアプローチの一つである. 非線形科学が「線形系以外の全領域」という

[15]生物はオートマトンでない, 脳はニューラルネットワークでない, コミュニケーションはShannon通信路的な構造を持たない, 言語はChomsky言語論ではとらえられない, 人間はゲームでNash解をプレイしない, 等. ではどうなのか, という問いの考察を放棄して, これらを情報工学やオペレーションズリサーチ (OR) といった応用研究の一種とみることも可能だが (現在ではこちらが一般的. 形式言語論はプログラミング言語の開発に応用される. 経済学におけるゲーム論も主にOR的な観点からしか論じられていない.), 基礎概念を分析し発展させていくという態度も重要であろう.

状況から自立できたのは，線形科学から離脱するための足場をカオスやソリトンといった概念が提供してくれた為であるといってもよいのではないかと思われるが，同様に非古典的情報論においても，足場となりうる新たな情報論的な概念を構築していく努力が必要である．

参考文献

[1] G. Boole, "The Laws of Thought," Macmillan, (1854).

[2] N. Chomsky, "Cartesian Linguistics," Harper & Row, (1966).

[3] J. Case, "Periodicity in generations of automata," *Mathematical Systems Theory*, **8**, p15-32, (1974).

[4] 金子邦彦, 池上高志,「複雑系の進化的シナリオ」, 朝倉書店, (1998).

[5] N. Kataoka, K. Kaneko, "Functional Dynamics I: Articulation Process," *Physica*, **D138**, p225-250, (2000).

[6] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5**, p115-133, (1943).

[7] C. Moore, "Generalized shifts: Unpredictability and undecidability in dynamical systems," *Nonlinearity*, **4**, p199-230 (1991).

[8] J. von Neumann, "Theory of Self-Reproducing Automata, " (ed.) A. W. Burks, Univ. Illinois Press / Urbana, (1966).

[9] J. von Neumann and O. Morgenstern, "Theory of Games and Economic Behavior," Princeton University Press, (1944).

[10] J. Myhill, "Finite Automata, Semigroups and Simulation," in Lecture Note for Summer Conf. on Automata Theory, Univ. of Michigan, (1960).

[11] J. R. Pierece, "The Early Days of Information Theory," IEEE. Trans. on Information theory, **19**, 1, p3-8, (1973).

[12] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, "Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition: Foundations," MIT Press, (1986).

[13] Y. Sato, M. Taiji and T. Ikegami, "Computation with switching map systems: Nonlinearity and Computational Complexity," Santa Fe Institute working paper, WP-01-12-083, (2001), submitted.

[14] C. E. Shannon, "Communication Theory — Exposition of Fundamentals," IRE Trans. Information Theory, **1**, p44-47, (1950).

[15] 津田一朗「カオス的脳観」, サイエンス社, (1991).

[16] A. M. Turing, "On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem," *Proc. London Math. Soc.*, **42**, p230, (1936).

[17] A. M. Turing, "Intelligent Machinery," National Physical Laboratory Report, (1948), in B. Meltzer and D. Michie (eds.), Machine Intelligence, Vol 5, p3-23, Edinburgh University Press, Edinburgh (1969).

[18] A. M. Turing, "Computing Machinery and Intelligence," *Mind*, **59**, 236, p433-460, (1950).

[19] A. M. Turing, "The Chemical Basis of Morphogenesis," *Phil. Trans. R. Soc. London*, **B237**, p37-72, (1952).

[20] S. Turing, "Alan M. Turing," (渡辺茂, 丹羽富士男訳,「アラン・チューリング」, 講談社, (1969)). 以下は J. Z. Young 宛ての書簡からの抜粋.「私は, 湯沸かしから雲にいたるまでのすべてのものと同様に脳をも実験の対象として考えることはいけないと思いますし, 同一視すれば大反対をうけるだろうと思います. したがって私はこの方法がかなりの成果をあげても脳を「対象」化してえられる結果を発表するつもりはありません ···(略)··· 私は今, 実際にはこのようなこと (注: 発生学の数学的理論) をしています. それは簡単に扱うことができるからです. 私はこの問題が前に述べた問題 (注: 人間の頭脳に関する問題) と全く無関係であるとは思っていません. 頭脳の構造は胎生発生の機構がはっきりすれば, 解決する問題です. 私が今研究している理論によって, この問題が抱えている障害が明らかになるだろうと思っています.」

[21] N. Wiener, "Cybernetics," MIT Press, (1961).